

2024 第三屆

三菱電機CNC智能APP創意開發競賽

---

# 應用於第三代半導體晶碲材料之CNC鑽石線線切割搭配 雙旋轉軸結合超音波振動輔助製造智能化APP系統開發

---

國立勤益科技大學

指導教授：林岳鋒、陳凱榮

隊員姓名：藍裕璿、陳冠宇、劉萱嫻、白晉璋

# 半導體產業-發展趨勢

傳導帶

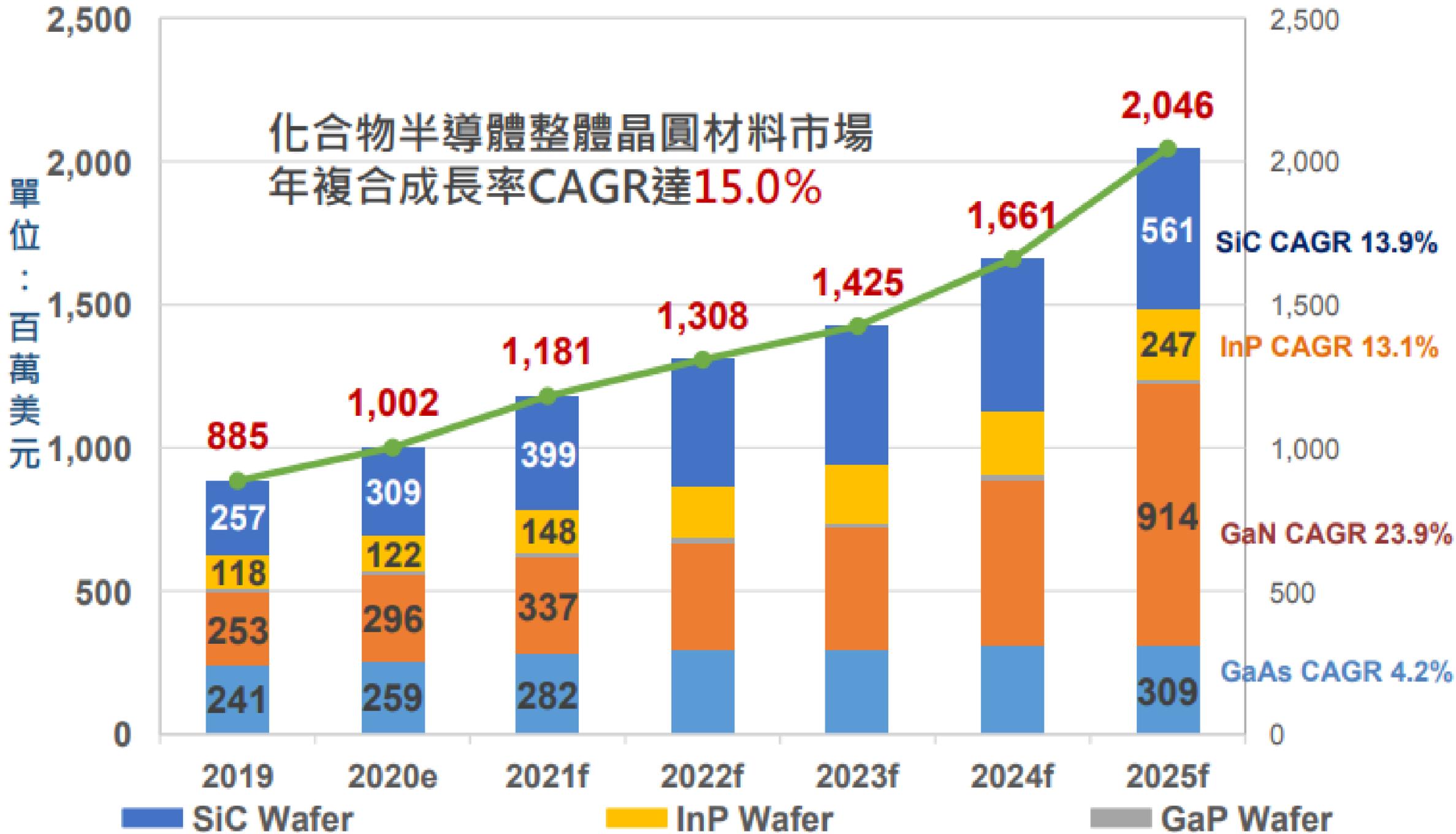
Low

PFC / PoE



< 200V

GaN (



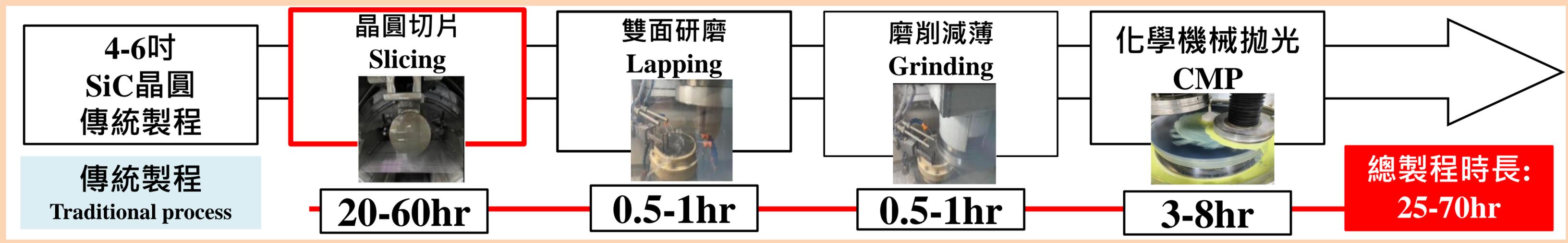
資料來源：工研院產科國際所 5V印系統，週百高功率

示意圖

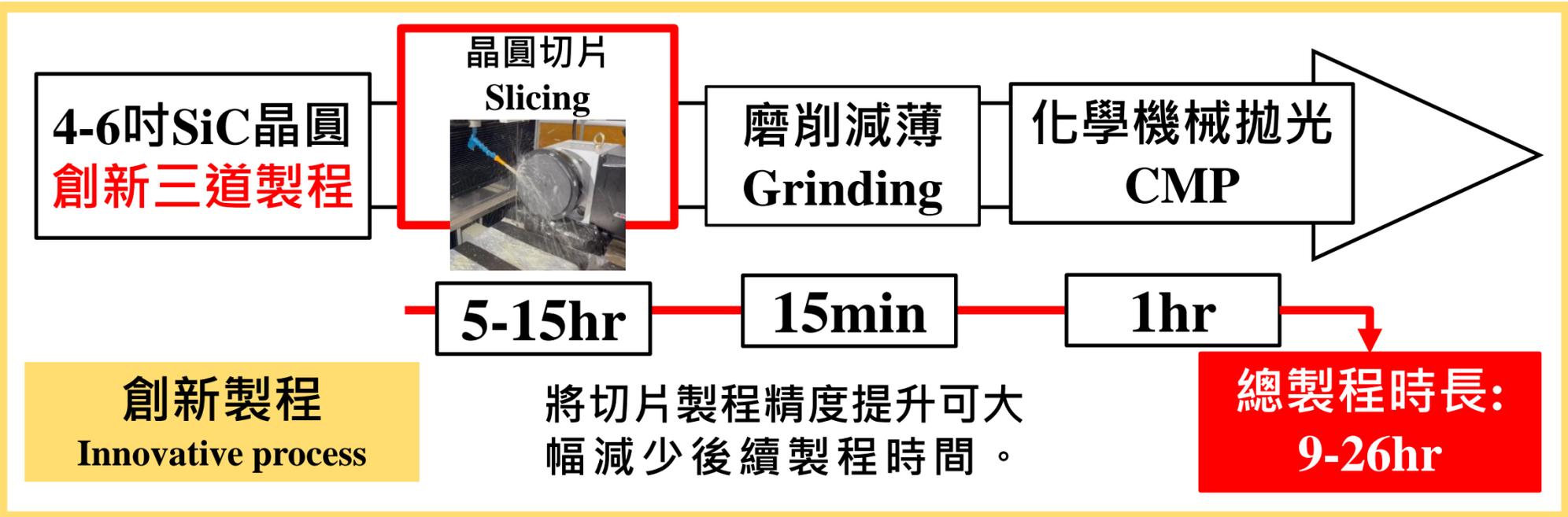
**產業痛點**  
4H-SiC高硬度、韌性低、耐蝕、  
切片損失高、加工時間長

# 本研究發展技術-Roadmap

**技術需求**  
SiC設備、製程、耗材需  
要標準化(SOP)



本研究**創新性**  
與製程**改善**

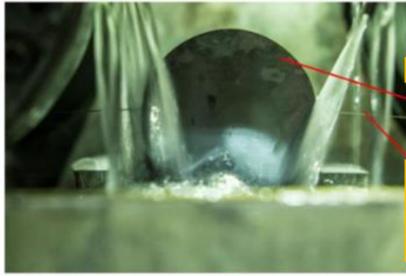
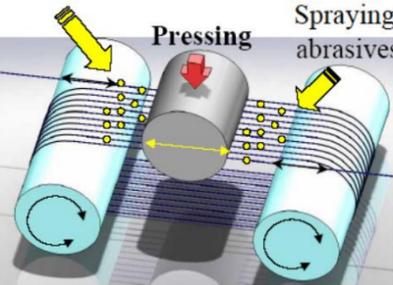
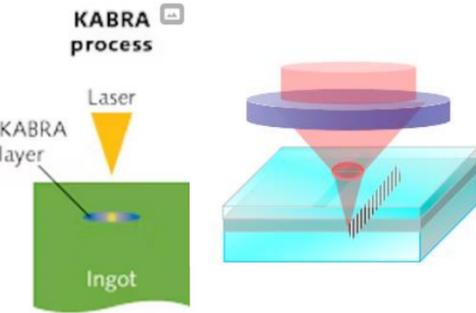


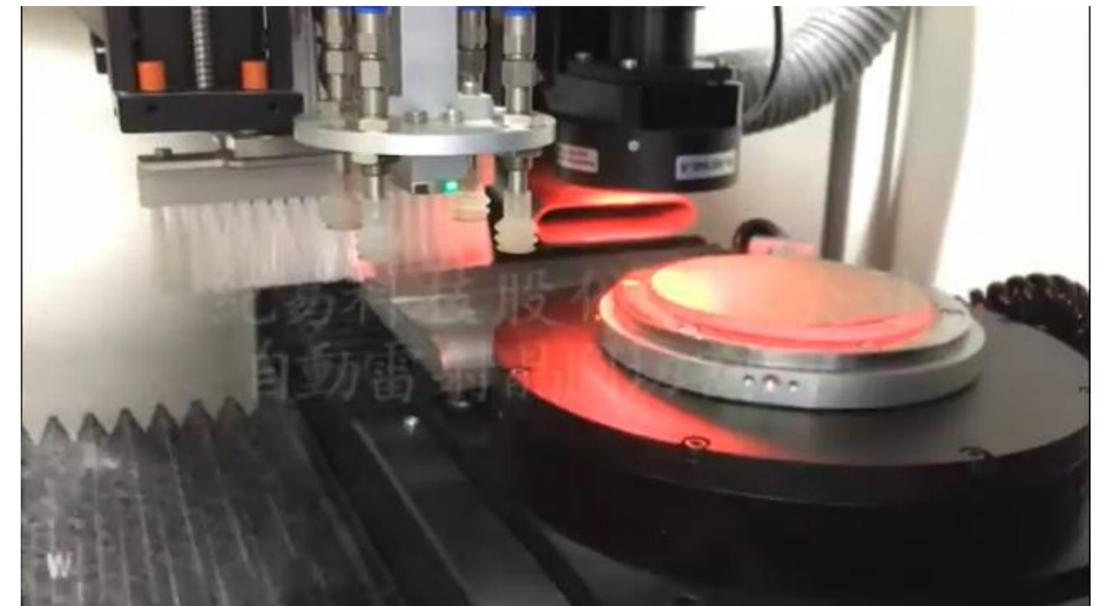
## 製程面臨挑戰

1. 硬度高，莫氏硬度分布9.2至9.6之間
2. 脆性高與韌性低在加工容易產生脆裂
3. 加工材料損失約占 50~60%
4. 晶圓切片時間長，耗費時間成本高

**總體加工效率提升: 80-120%**

# 晶圓切割技術

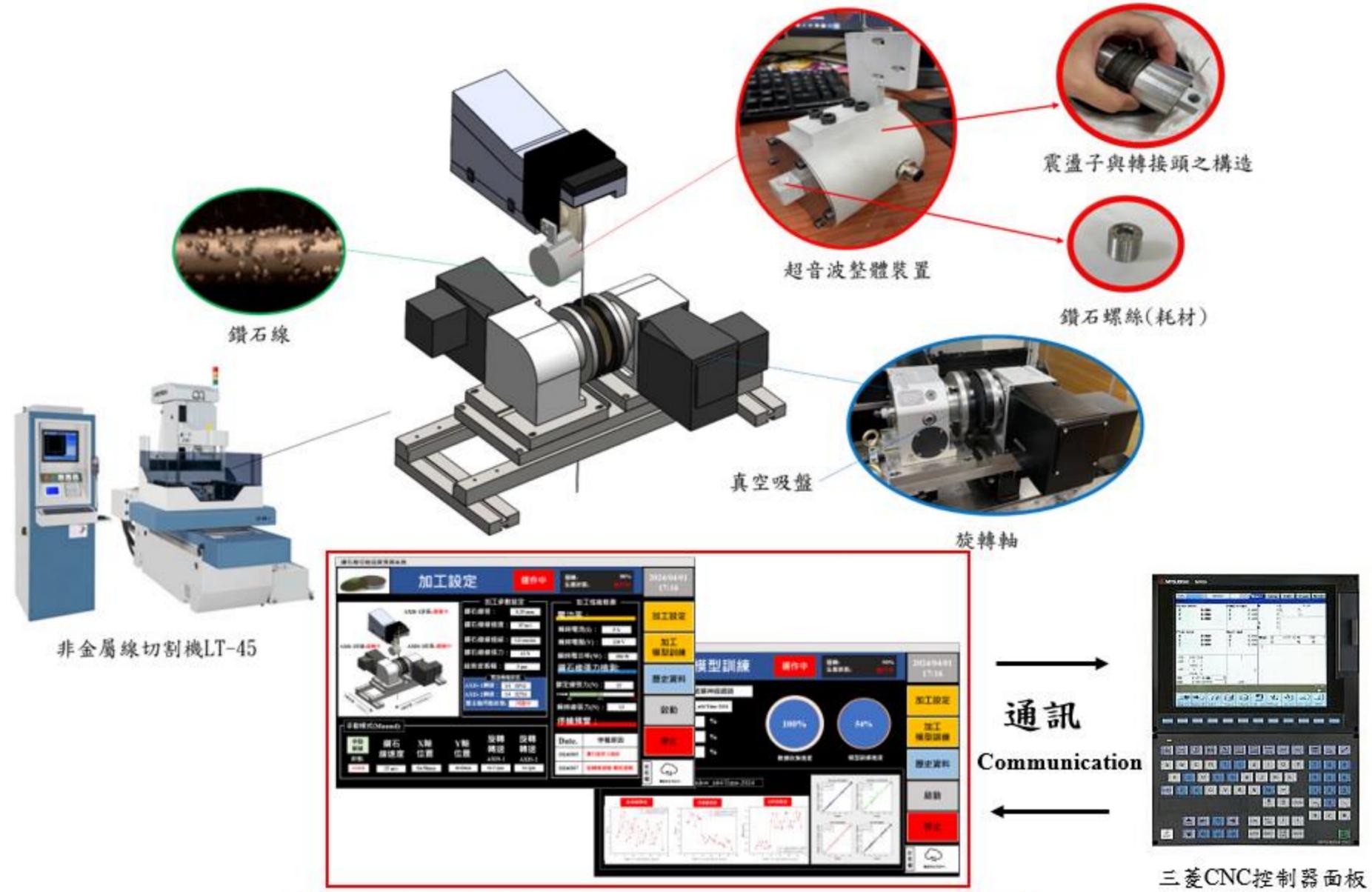
O>△>X	Wire Slicing		Laser
	微放電加工	鑽石線切割	
Schematic of process			
Kerf loss(μm)	X	X	O
Process time(min)	X	△	O
Flatness	△	△	O
Surface roughness(μm)	O	△	△
Tool price	△	O	X



1. 前期投資本低，性價比高
2. 本研究方法助於切割減少製程時間，提高工件精度
3. 提升傳統產業與半導體產業競爭力

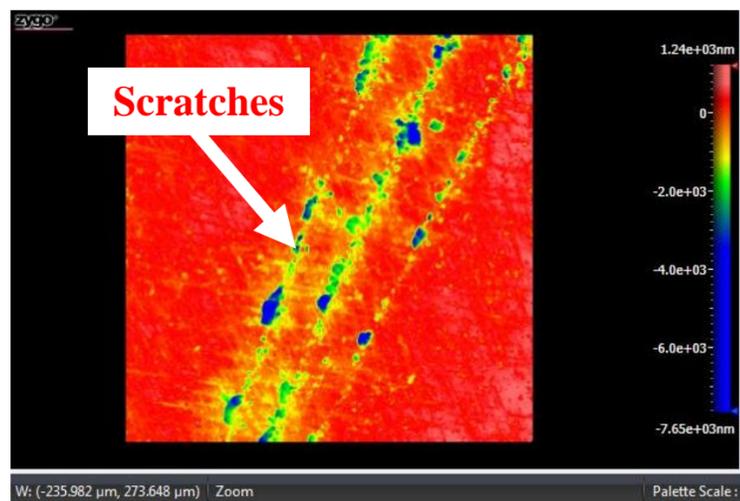
開發成本與技術門檻較高!

# 系統架構



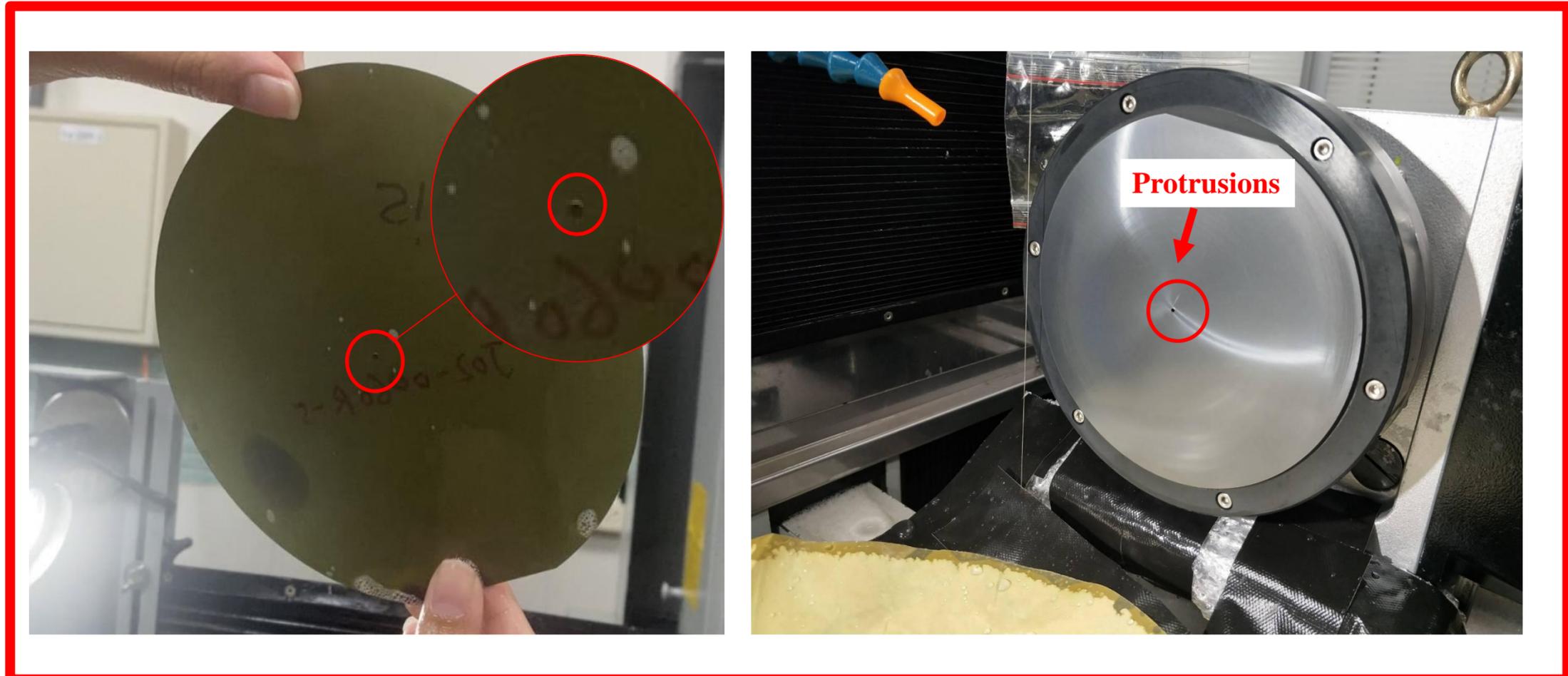
C#APP介面應用於單晶碳化矽晶錠材料智慧自動化晶錠材料整合系統

## 使用雙旋轉軸原因



← 切片掉落時，會碰撞運行中的鑽石線，並在切片表面留下刮痕

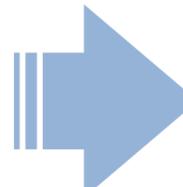
使用單邊旋轉軸時，因硬脆材料脆性斷裂特性，會在切片及晶碲中心留下凸點



單軸切削晶碲畫面:缺少切片掉落保護機制

# 實驗設計與規劃

機台:聯盛 LT-45  
材料:6吋4H-SiC  
線材:0.33mm鑽石線  
超音波模組  
雙旋轉軸模組搭配真空吸盤

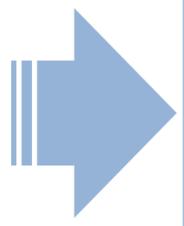


**透過實驗設計方法**  
(參考文獻回顧並訂定加工參數)  
工件轉速(rpm):0、32、64  
進給(mm/min):0.17、0.2、0.23  
超音波振幅( $\mu\text{m}$ ):0、3、6

實際值與預測值誤差若超過10%  
回倒傳遞神經網路修改隱藏層參數  
以及重新擬定實驗設計



加工驗證若失效則  
重新進行實驗設計



導入實驗設計方法參數優化

$L_{27}$  直交表

S/N比探討  
影響碳化矽切片  
加工最佳參數

表面粗糙度( $S_z$ )  
厚度變異量(TTV)  
材料移除率(MRR)

超音波振幅( $\mu\text{m}$ )

工件轉速(rpm)

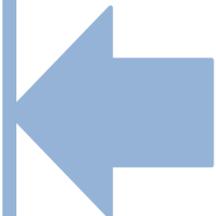
進給(mm/min)

將預測值與實際實驗值進行誤差分析

S/N比找出最佳  
並進行加工驗證

## 討論

1. 透過實驗設計方法S/N比找出最佳參數設計，並進行加工驗證。
2. 討論線性回歸預測與實際實驗值誤差。
3. 透過倒傳遞類神經網路(BPNN)與實際實驗值誤差範圍探討。
4. 比較線性回歸預測與倒傳遞類神經網路(BPNN)優劣。
5. 利用碳化矽切片後標準程序進行與其他加工法效益評比。



導入倒傳遞類神經網路預測  
(BPNN)

輸入層

工件轉速(rpm)  
進給(mm/min)  
超音波振幅( $\mu\text{m}$ )

輸出層

表面粗糙度( $S_z$ )  
厚度變異量(TTV)  
材料移除率(MRR)

預測值與實際實驗值進行誤差分析

2024 第三屆

三菱電機CNC智能APP創意開發競賽

---

# APP系統介面-介紹

# 2024 第三屆 三菱電機CNC智能APP創意開發競賽

## 軟體介面-加工設定



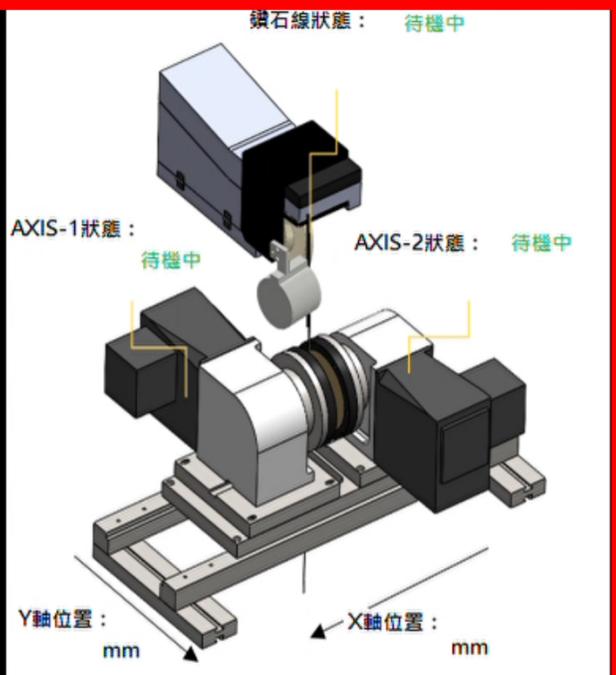
第三代半導體智能化APP系統

### 加工設定

待機中

運轉：0%  
生產狀態：待機中

2024/6/19 下午  
10:15:04



鑽石線狀態：待機中

AXIS-1狀態：待機中

AXIS-2狀態：待機中

Y軸位置：mm

X軸位置：mm

#### 加工參數設定

鑽石線徑：0.33 mm

鑽石線線速度：15 m/s

鑽石線線進給：0.23 mm/min

鑽石線線張力：15 N

超音波振幅：3 μm

雙旋轉軸狀態

AXIS-1轉速：64 RPM

AXIS-2轉速：64 RPM

雙主軸同動狀態：待機中

#### 加工性能檢測

電功率：

瞬時電流(I)：5 A

瞬時電壓(V)：110 V

瞬時電功率(W)：550 W

鑽石線張力檢測：

額定線張力(N)：15

切割負載  0% 100%

瞬時線張力(N)：13

停機預警：

Date.	停機原因
2024/07/03	鑽石線張力過低
2024/07/03	切銷路徑異常

加工設定

加工模型訓練

歷史資料

啟動

停止

狀態欄  
雲端同步：  
同步中

直觀性、簡易性、智慧性

鑽石線切割品質預測系統介面選單

三大主要選單：

- 加工設定
- 加工模型訓練
- 歷史資料

加工設定

- 加工參數設定 (基本加工參數設定)
- 手動模式(Manual)
  - X軸移動位置控制
  - Y軸移動位置控制
  - 旋轉軸轉速控制
- 加工性能檢測(電功率、鑽石線張力、停機預警)

→ 提供操作者直觀了解機台運作狀態欄

第三代半導體智能化APP系統

加工模型訓練

待機中

運轉： 0%  
生產狀態： 待機中

2024/6/19 下午 10:16:01

演算法選擇： BPNN導傳遞類神經網路

訓練資料來源： 選擇檔案

數據訓練比率： 70 %

驗證數據比率： 15 %

數據測試比率： 15 %

執行演算法

數據收集進度 0%

模型訓練進度 0%

加工設定

加工模型訓練

歷史資料

啟動

停止

狀態欄

雲端同步： 同步中

### 加工模型訓練

- 演算法基本設定
  - 訓練資料來源選擇
  - 數據訓練比率
  - 驗證數據比率
  - 數據測試比率
- 訓練模型進度即時檢測
- 模型預測結果

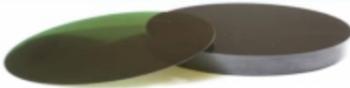
### BPNN 倒傳遞類神經預測結果

- 表面粗糙度
- 材料移除率
- 厚度變異量
- 預測擬合圖

優先進行預測，讓操作員可依預測模型進行參數調整，達到更好的加工品質，減少加工試誤法。

# 2024 第三屆 三菱電機CNC智能APP創意開發競賽

## 軟體介面-歷史資料



第三代半導體智能化APP系統

### 歷史資料

待機中

運轉：0%  
生產狀態：待機中

2024/6/19 下午 10:16:42

Set Record

#### 生產履歷

工單編號	加工時間(min)	工件材質	工單完成度	完成時間
		<input type="text"/>		
		<input type="text"/>		

#### 異常生產履歷

異常發生時間	異常內容	確認時間	恢復時間	當前狀態
	<input type="text"/>			
	<input type="text"/>			
	<input type="text"/>			

加工設定

加工模型訓練

歷史資料

啟動

停止

狀態欄

雲端同步：  
同步中

### 歷史資料

#### • 生產履歷

- 運轉完成後，立即自動建立工單
- 自行建立工單

#### • 異常生產履歷

- 異常內容上報資訊
- 異常當前狀態

- 操作者通過界面查詢先前加工後的數據資料，清楚了解歷史生產履歷和加工情況。
- 異常生產履歷，及時解決加工過程中的問題，保證生產的正常運行。

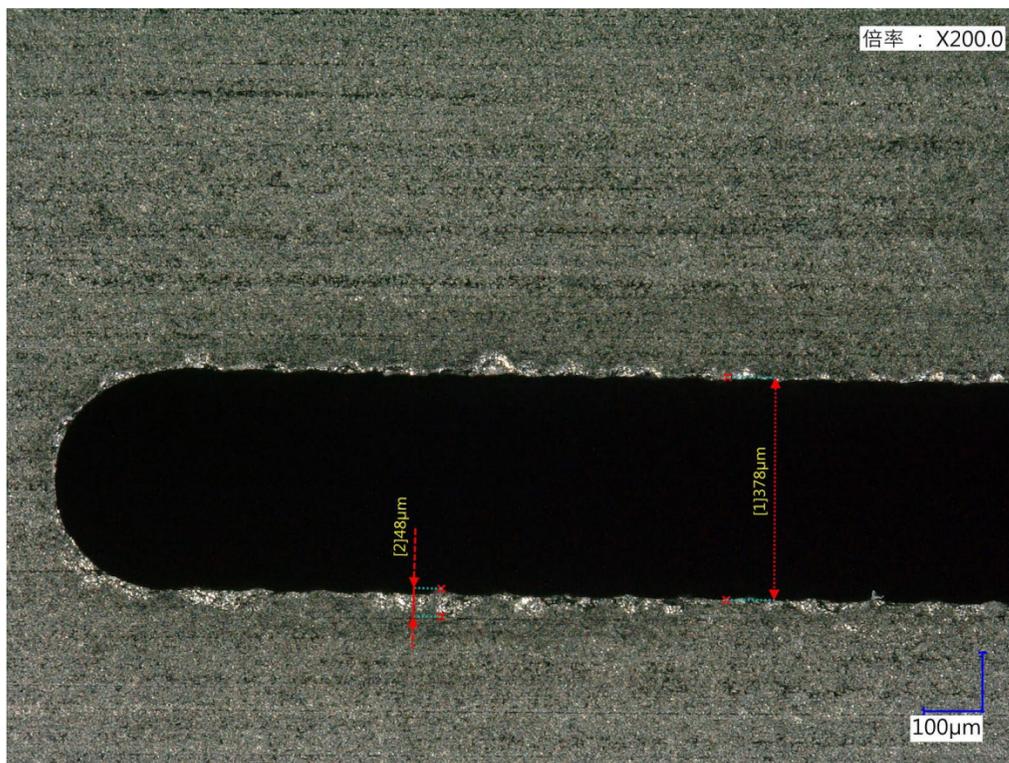
2024 第三屆

三菱電機CNC智能APP創意開發競賽

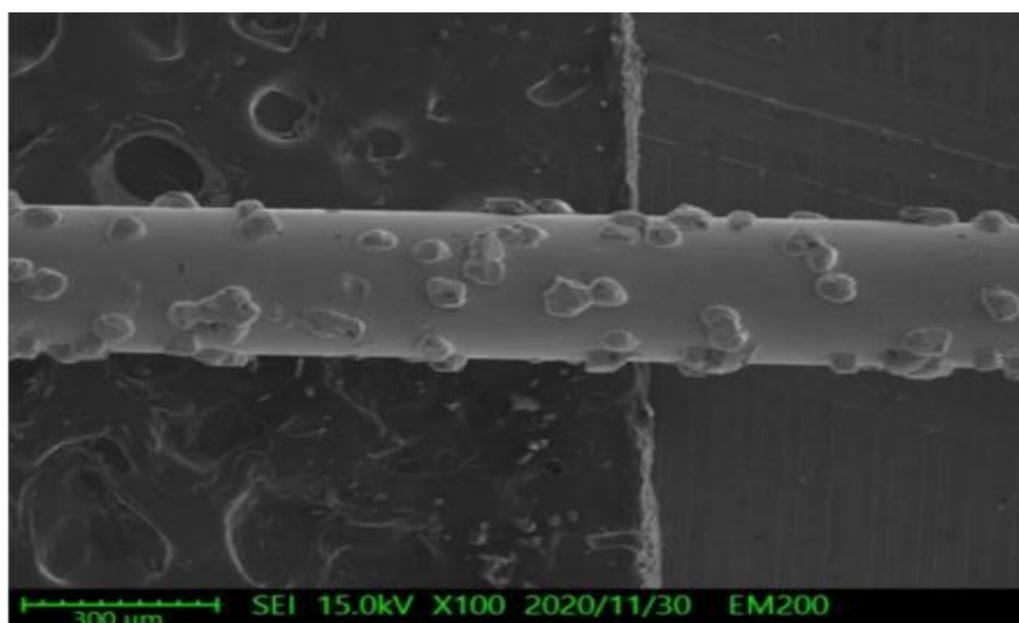
---

# 加工實驗流程與結果分析

# 材料移除率與線切縫耗損



溝槽寬度：0.375mm



鑽石線線徑(含磨料):0.33mm

## Material Removal Rate:MRR(材料移除率)

以鑽石線線徑：0.33mm  
切口損失寬度：0.375mm  
切割時間：216 min 為例

$V_t$ ：切損總體積( $mm^3$ )

$A_t$ ：晶圓面積( $mm^2$ )

$KL$ ：切口損失( $mm$ )

$t$ ：切割時間( $min$ )

**MRR**：材料移除率( $mm^3/min$ )

$$\begin{aligned} V_t &= A_t \times KL = \frac{\pi}{4} D^2 \times KL \\ &= \frac{\pi}{4} 150^2 \times 0.375 \\ &= 6626.797 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

**本研究**

$$MRR = \frac{V_t}{t} = \frac{6626.797}{216} = 30.67 \text{ mm}^3/min$$

**傳統製程 (複線式)**

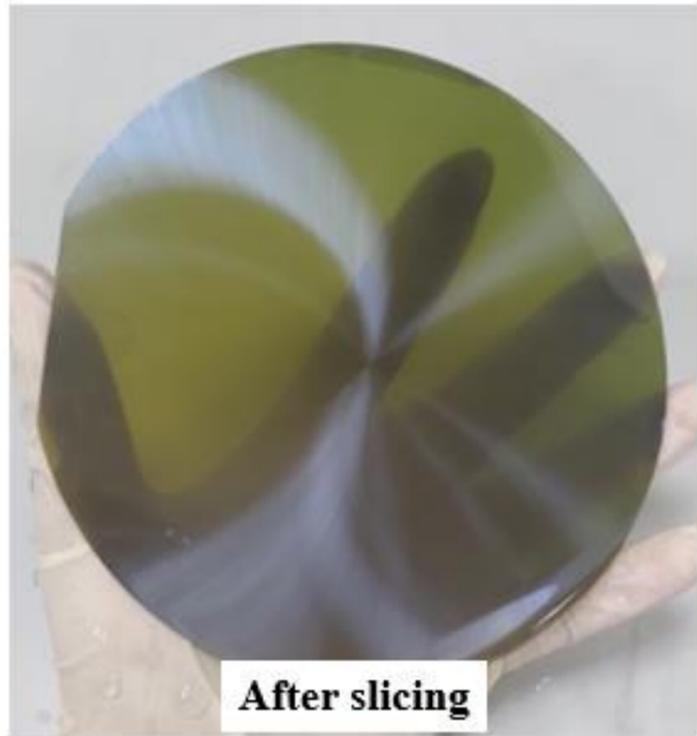
$$MRR = \frac{V_t}{t} = \frac{7587}{1110} = 6.83 \text{ mm}^3/min$$

↑ 對比複線式鋸切材料移除率

田口參數組合L27(1 9 13)			
轉速(rpm)	進給(mm/min)	超音波振幅(µm)	材料移除率(MRR)( $mm^3/min$ )
0	0.17	0	11.129
0	0.2	3	12.782
0	0.23	6	15.138
0	0.2	6	12.905
0	0.23	0	14.997
0	0.17	3	11.182
0	0.23	3	14.927
0	0.17	6	11.235
0	0.2	0	12.782
32	0.2	6	25.897
32	0.23	0	29.888
32	0.17	3	22.434
32	0.23	3	29.748
32	0.17	6	22.575
32	0.2	0	25.599
32	0.17	0	22.364
32	0.2	3	25.651
32	0.23	6	30.469
64	0.23	3	30.012
64	0.17	6	22.838
64	0.2	0	25.774
64	0.17	0	22.522
64	0.2	3	25.739
64	0.23	6	30.680
64	0.2	6	26.231
64	0.23	0	30.152
64	0.17	3	22.698

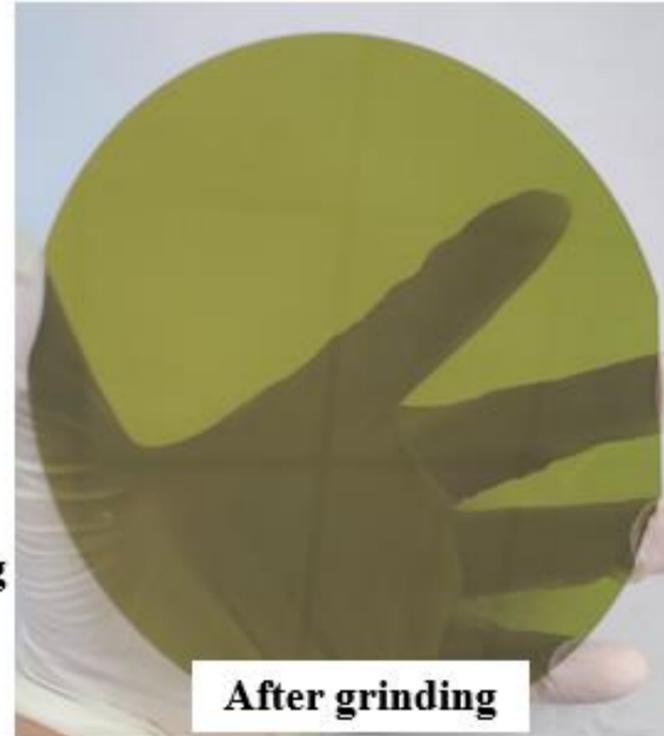
透過實驗設計方法L27實驗後，工件轉速提升以及調整超音波振幅材料移除率能有明顯提升。

# 4H-SiC切片後精度量測

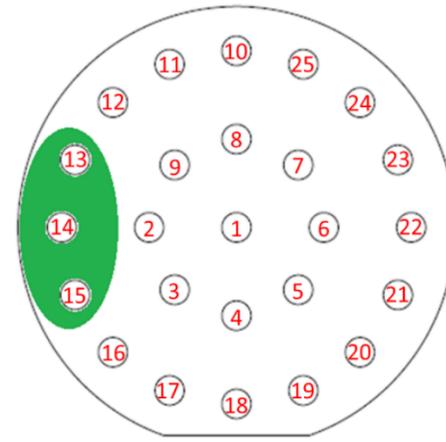


6吋單晶碳化矽(4H-SiC)切片後成品

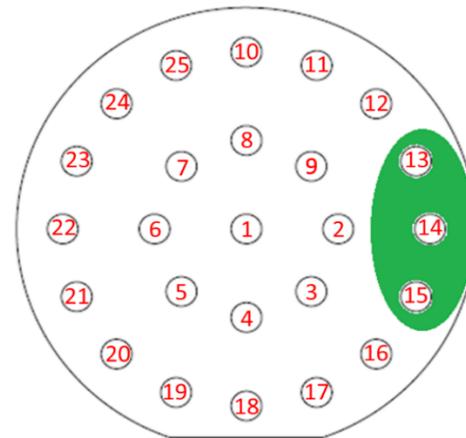
Grinding



6吋單晶碳化矽(4H-SiC)超精研磨後成品



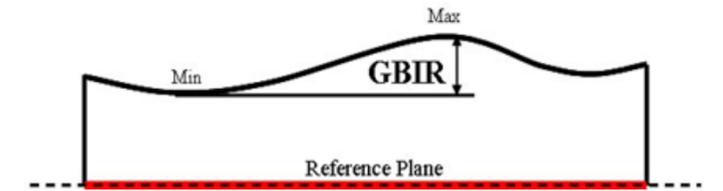
晶圓C-Face



晶圓Si-Face

## TTV(厚度變異量)

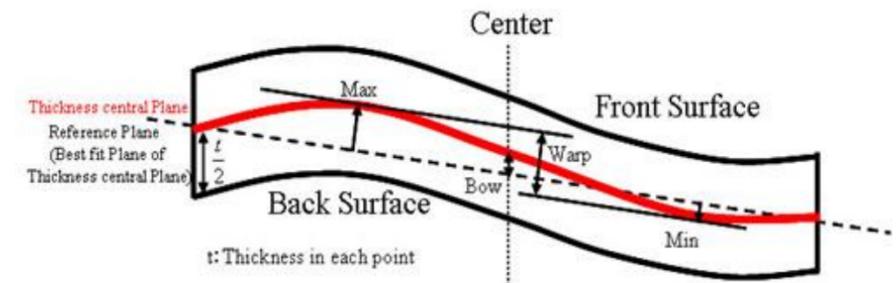
距離參考平面厚度的最大值和最小值的差值(單位:μm)



## Bow&Warp(彎曲度&翹曲度)

Bow(彎曲度):晶圓中心點表面距離參考平面的最小值和最大值之間的偏差。(單位:μm)

Warp(翹曲度):晶圓背面為參考平面, 測量的晶圓表面距離參考平面的最小值和最大值之間的偏差。(單位:μm)



Wafer thickness	
預計厚度	450μm
平均厚度	448.2μm

After slicing

Self-made	C-Face	Si-Face
TTV平坦度	9.3μm	
Warp翹曲度	56.6μm	
Bow彎曲度	27.5μm	
表面粗糙度Sz	1.1μm	2.1μm

Purchase	Measurement
TTV	≤ 30 μm
Warp	≤ 80 μm
Bow	≤ 70 μm

# 實驗設計方法實驗結果與預測分析

## Sz回歸方程

$$Sz(\mu m) = 5.0243 + 0.7866 S_0 - 0.2050 S_{32} - 0.5816 S_{64} - 1.9697 F_{0.17} - 0.0024 F_{0.20} + 1.9721 F_{0.23} + 0.4956 A_0 - 0.6054 A_3 + 0.1098 A_6$$

## TTV回歸方程

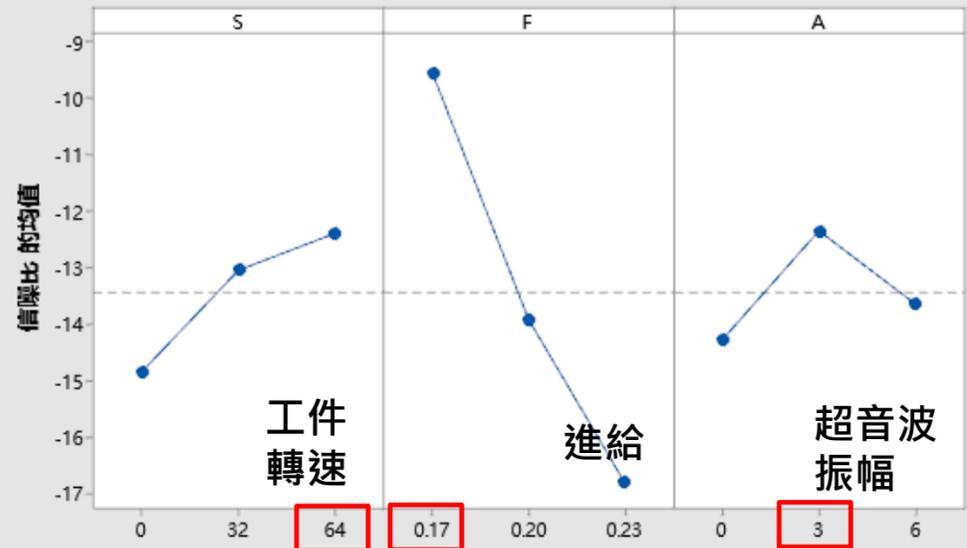
$$TTV(\mu m) = 18.037 + 10.130 S_0 - 3.337 S_{32} - 6.793 S_{64} - 1.704 F_{0.17} - 0.137 F_{0.20} + 1.841 F_{0.23} - 0.081 A_0 - 1.904 A_3 + 1.985 A_6$$

## MRR回歸方程

$$MRR(mm^3/min) = 1.2219 - 0.5346 S_0 + 0.2609 S_{32} + 0.2737 S_{64} - 0.1540 F_{0.17} + 0.0001 F_{0.20} + 0.1539 F_{0.23} + 0.0118 A_0 - 0.0410 A_3 + 0.0292 A_6$$

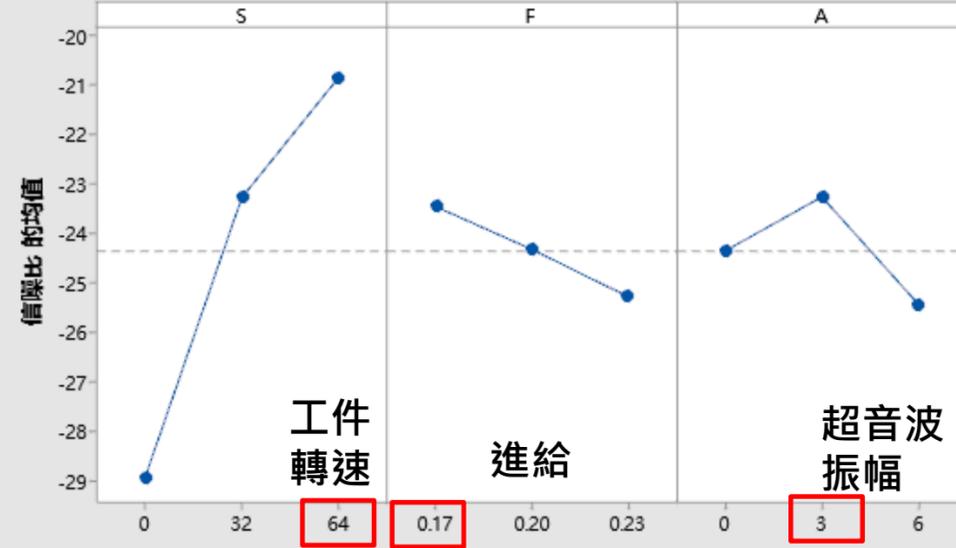
信噪比 主效应图  
数据均值

Sz信噪比



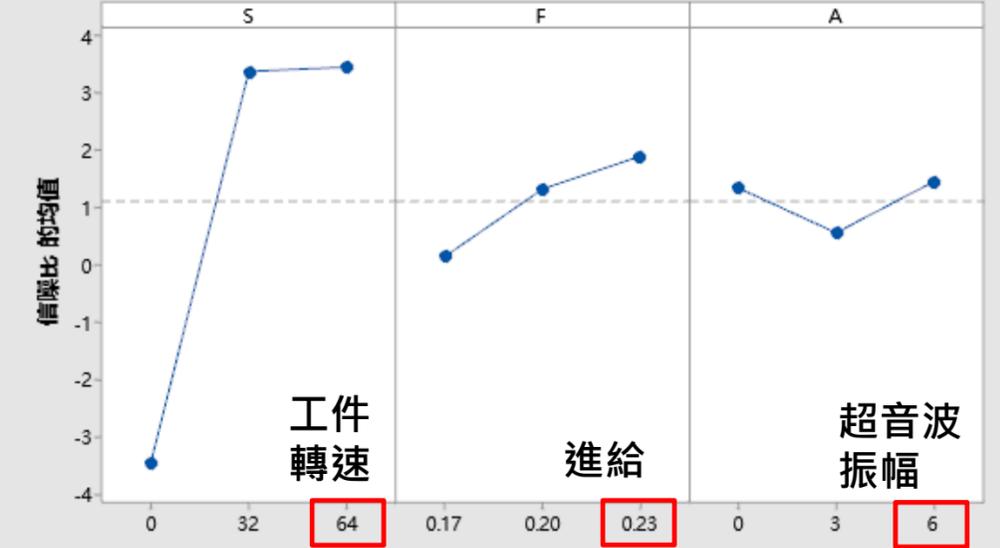
信噪比 主效应图  
数据均值

TTV信噪比

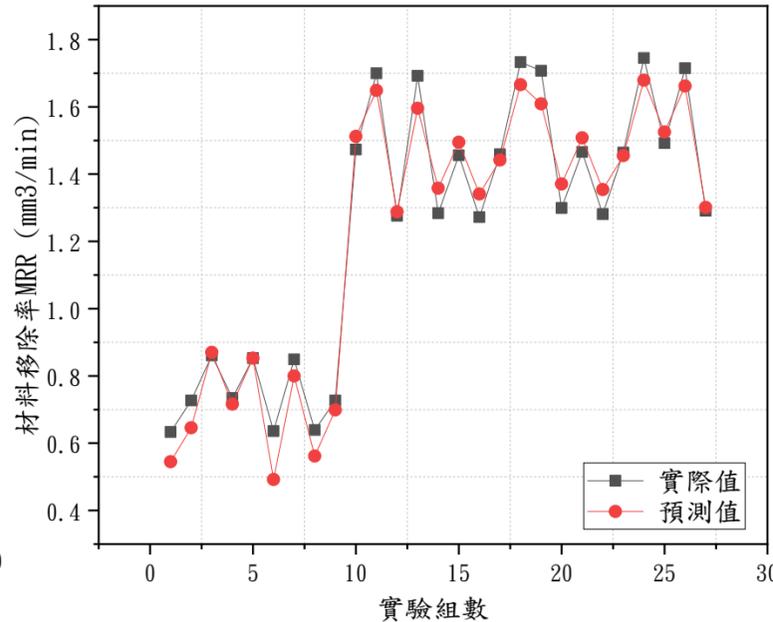
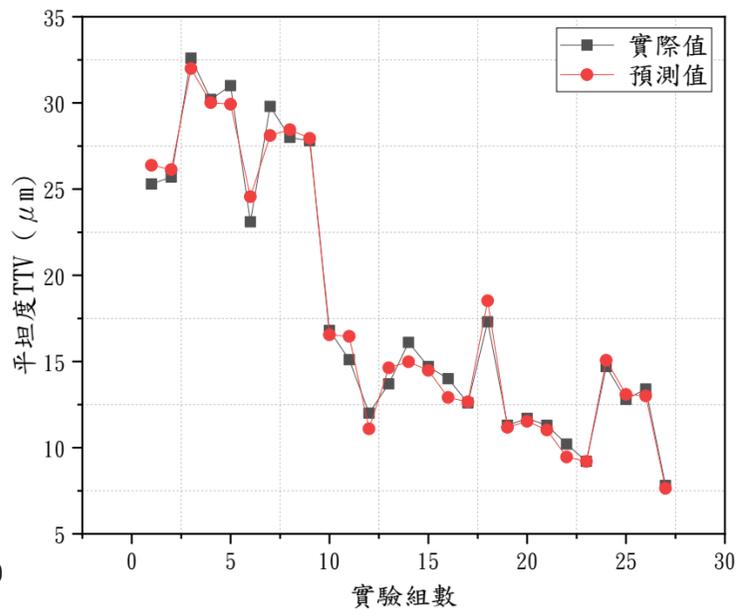
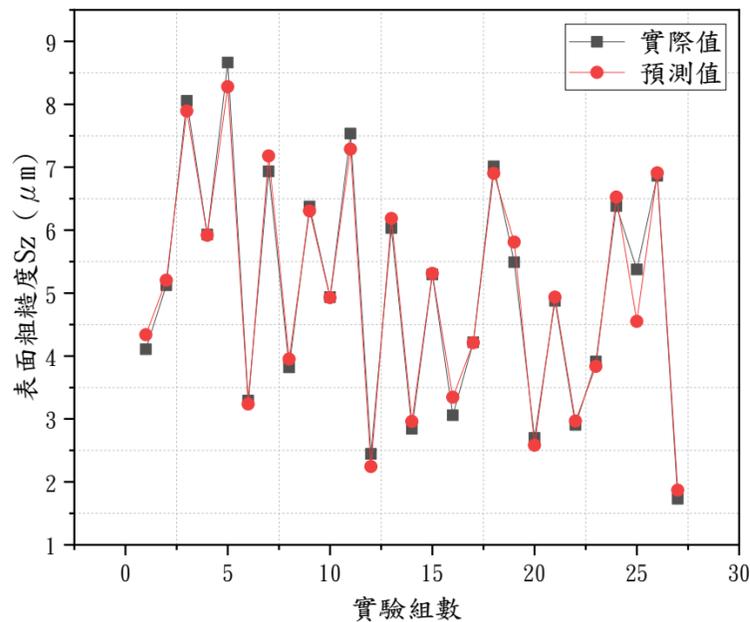


信噪比 主效应图  
数据均值

MRR信噪比



## 線性擬合預測值與實際實驗值比對



## 透過實驗設計獲得最佳化加工參數

	工件轉速 (rpm)	進給 (mm/min)	超音波振幅 (μm)
Sz	64	0.17	3
TTV	64	0.17	3
MRR	64	0.23	6

註:TTV厚度變異量、表面粗糙度Sz、材料移除率MRR

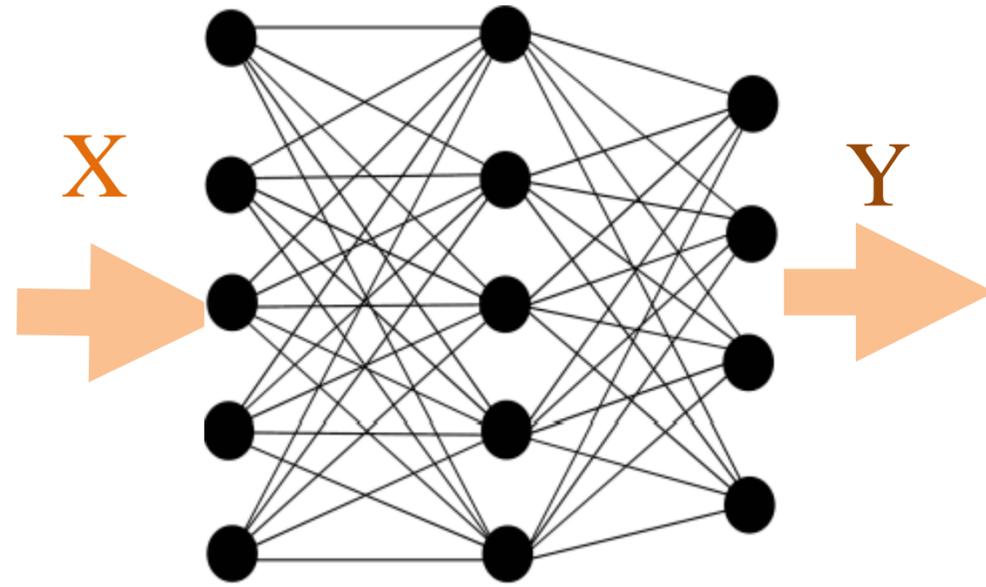
# 倒傳遞類神經網路(BPNN)預測分析

輸入層

工件轉速(rpm)

進給(mm/min)

超音波振幅( $\mu\text{m}$ )

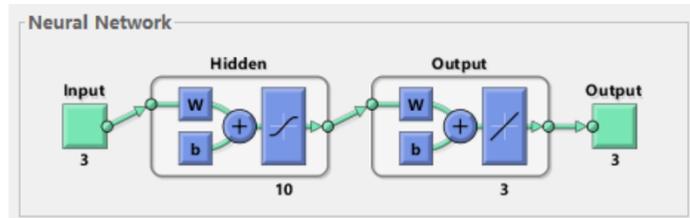


輸出層

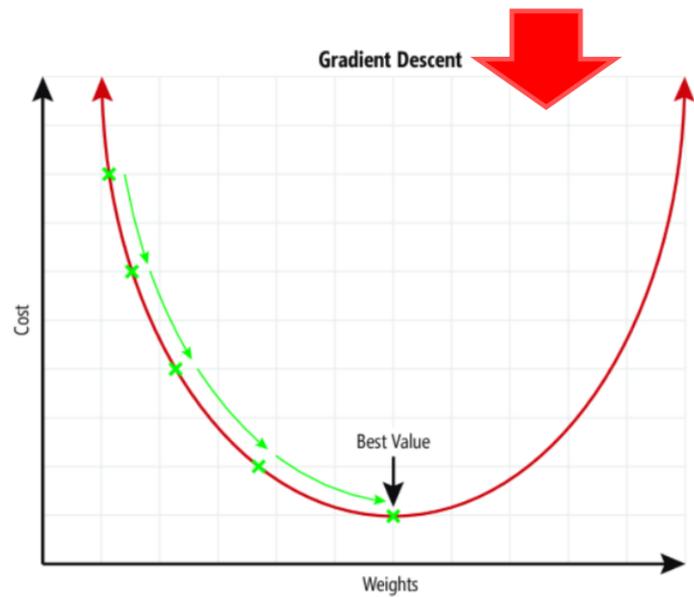
材料移除率(MRR)

表面粗糙度(Sz)

厚度變異量(TTV)



學習方法為高斯牛頓法(梯度下降法一種)

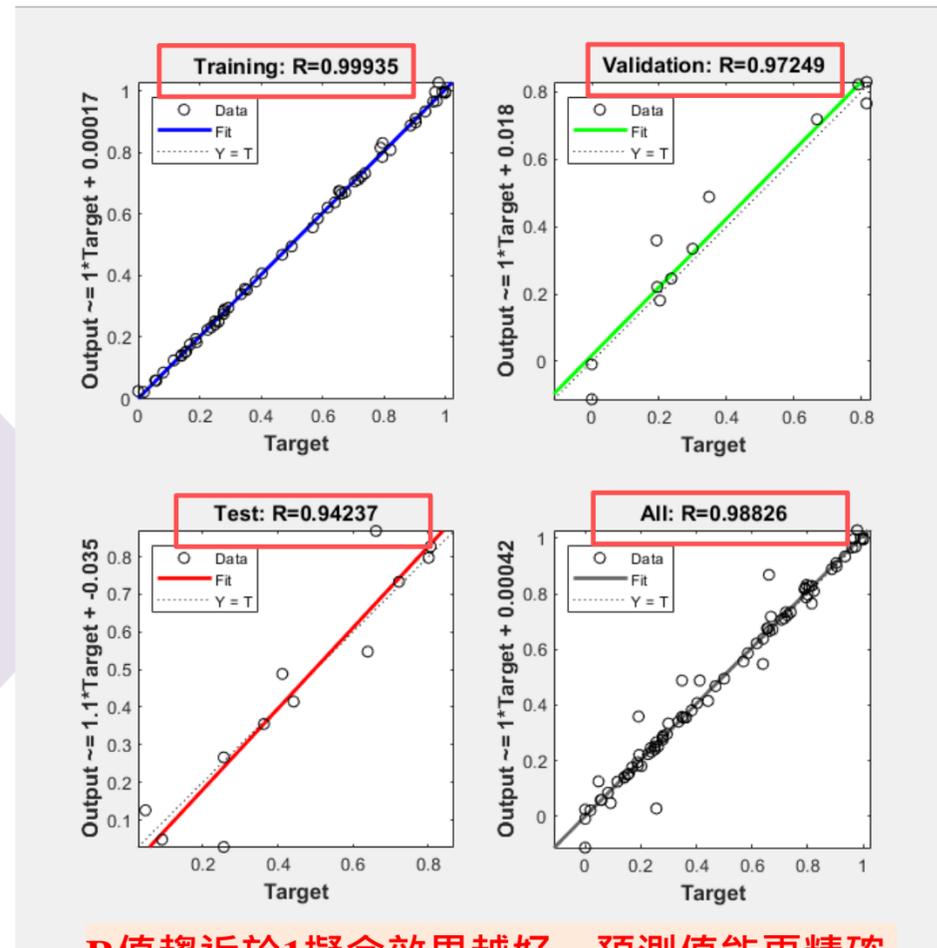


實驗數據擬合分配

訓練70%

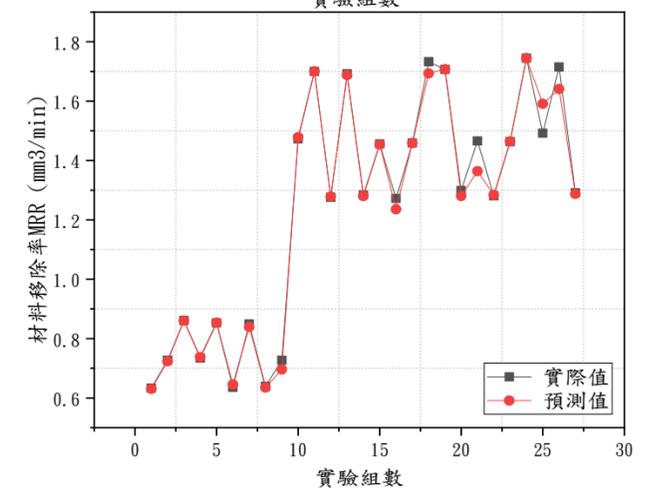
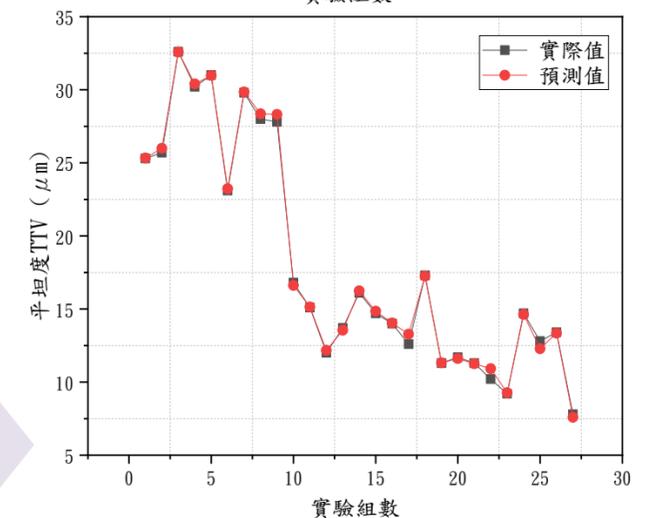
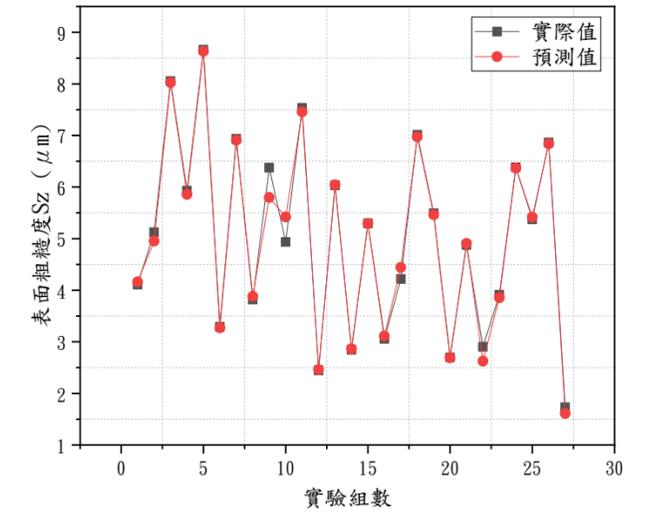
驗證15%

測試15%



R值趨近於1擬合效果越好，預測值能更精確

預測值與  
實際值對比



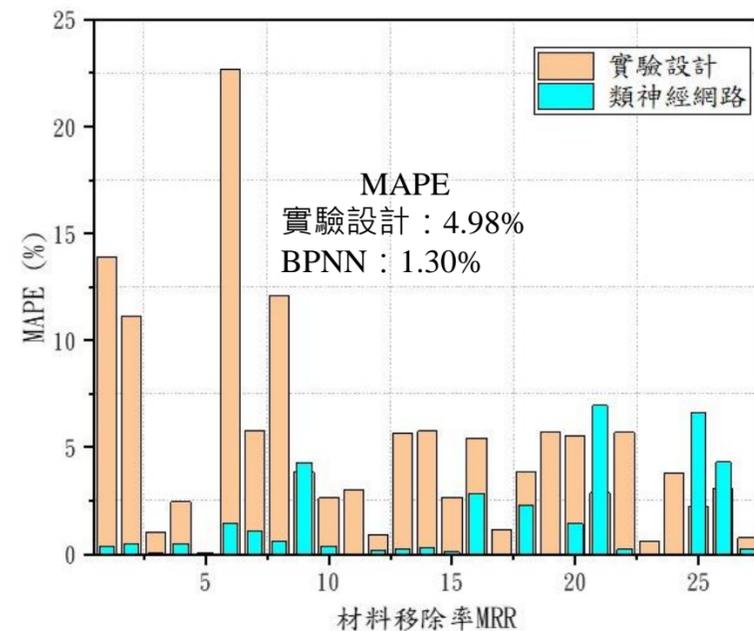
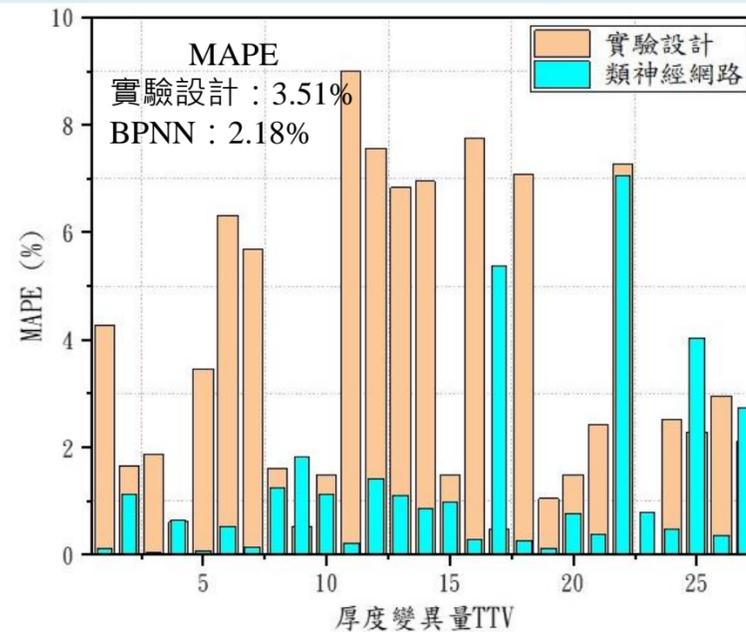
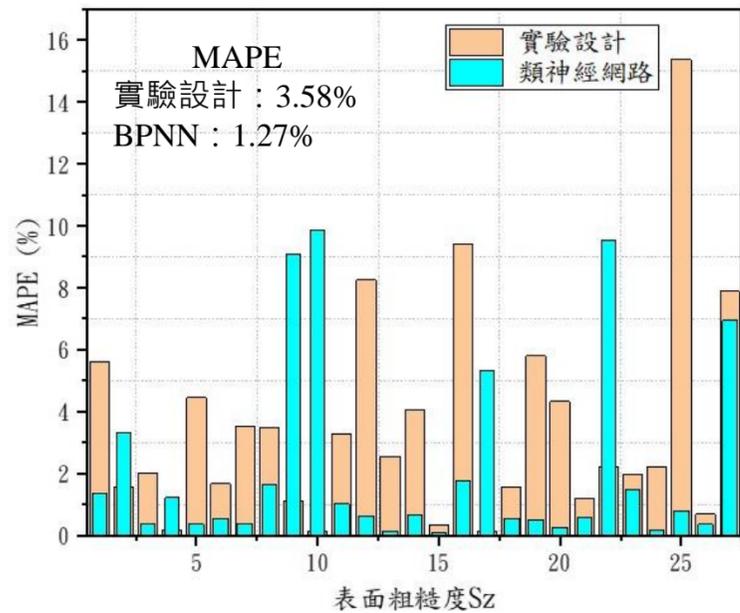
# 實驗設計線性擬合與倒傳遞類神經網路(BPNN)預測誤差分析

$$MAPE = \text{ABS}(\text{Actual} - \text{Forecast}) / (\text{Actual})$$

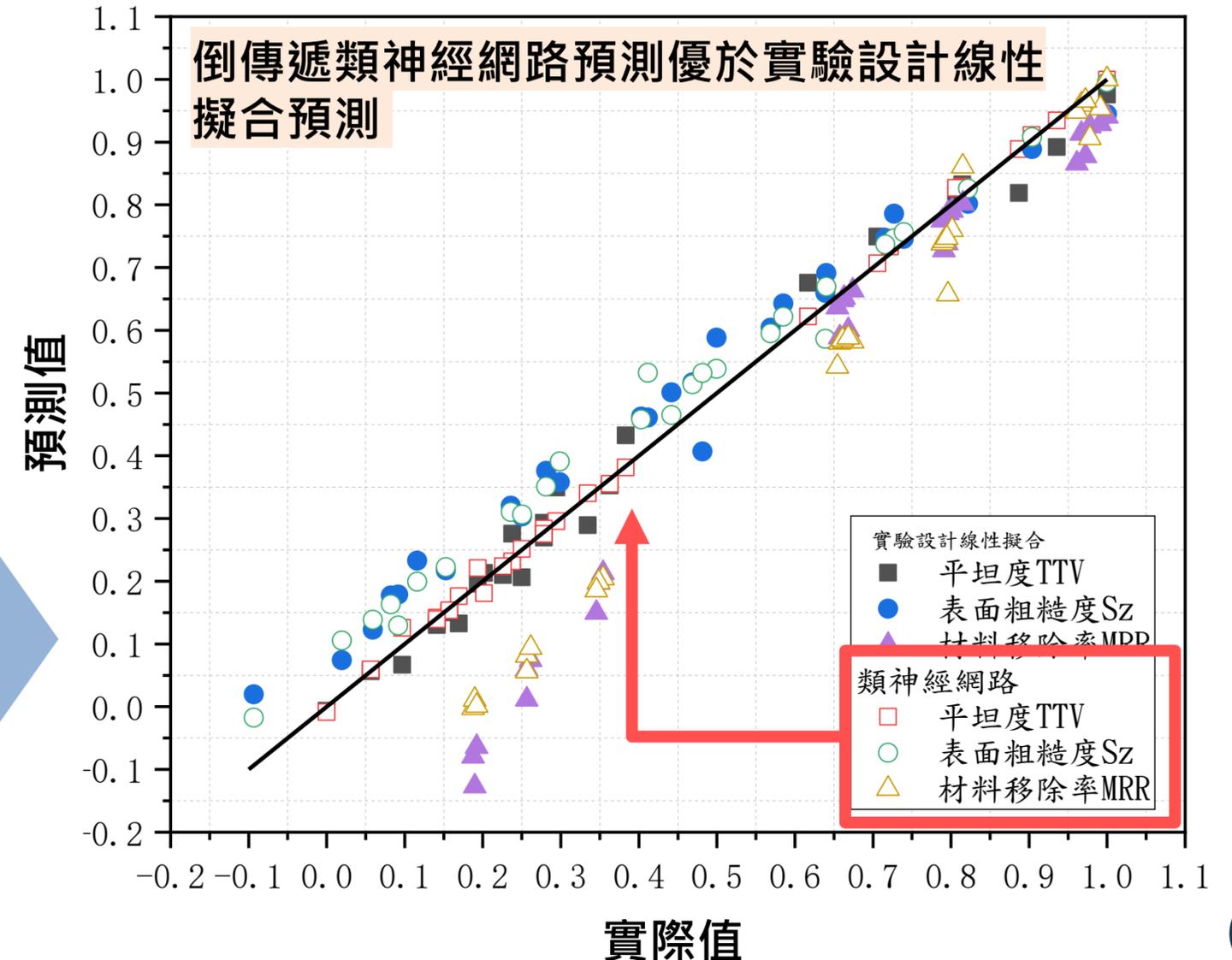
**MAPE**  
(平均絕對百分比誤差)

$$M = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|$$

MAPE	預測能力
<10%	極佳
10%~20%	優良
20%~50%	合理
>50%	不正確



透過實驗設計線性擬合方法與倒傳遞類神經網路(BPNN)預測誤差分析圖表可以得知利用倒傳遞類神經網路(BPNN)預測方法能更貼近實際實驗數值。



2024 第三屆

三菱電機CNC智能APP創意開發競賽

---

# 結論與未來展望

# 核心價值

## 減少成本

Cost Down

## 人力與開發成本

降低操作人員使用門檻，整合(加工、預測、回饋)功能於APP介面，**減少製程中成本損耗**

## 創新專利

提出創新雙旋轉軸輔助切割晶碲裝置，改善上游半導體製程，將**製程整合並縮短加工時間**，發明專利已通過。

## ESG - 友善環境&能源損耗降低

創新製程取代傳統砂漿製程，透過加工性能檢測即時電功率，並調整加工參數減少加工過程中能源損失，**達到永續能源發展**。

## 效率提升

Efficiency improvement

4-6吋SiC晶圓  
**創新三道製程**

晶圓切片  
Slicing



磨削減薄  
Grinding

化學機械拋光  
CMP

5-15hr

15min

1hr

總製程時長:  
**9-26hr**

傳統製程時長:  
**25-70hr**

總體加工效率提升:**80-120%**

## 創新製程

Innovative process

## 智能化APP系統加工結果與討論

## 超音波&工件轉速

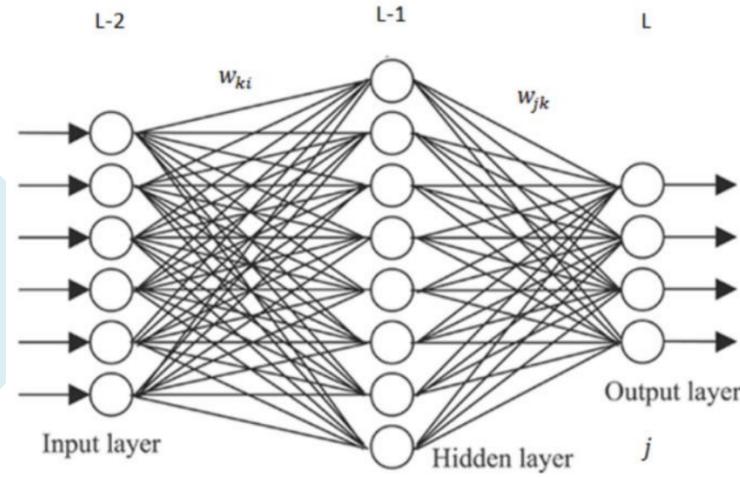
在**超音波振幅3 $\mu$ m**以及隨著工件轉速提升實驗條件下，可明顯改善晶碲切削品質，較沒導入超音波改善降低表面粗糙度約**78.51%**，厚度變異量TTV降低約**74.84%**，材料移除率MRR提高**175.67%**。

## 加工預測分析

使用倒傳遞類神經網路(BPNN)中進行表面粗糙度(Sz)、厚度變異量(TTV)、材料移除率(MRR)的預測誤差能控制在**5%以下**，且**倒傳遞類神經網路預測方法比實驗設計線性擬合預測能更貼近實際實驗數值**。

# 未來與展望

## 半導體晶圓切割裝置及晶圓切割方法-商品化



廠商合作



中國砂輪企業股份有限公司



創技工業股份有限公司



台灣鑽石工業股份有限公司



健陞機電工業股份有限公司

雙主軸模組與APP系統導入 使用倒傳遞類神經網路 (BPNN) 進行預測分析

## 智能化晶錠切片APP系統與上游半導體技術整合-帶動工具機產業整體技術升級與轉型

Slicing->Grinding->CMP



After slicing



After grinding



2024 第三屆

三菱電機CNC智能APP創意開發競賽

---

Q&A